

LA TAD ET LA RECHERCHE SUR LES ENVIRONNEMENTS NUMÉRIQUES POUR L'APPRENTISSAGE DES MATHÉMATIQUES

Caroline Ladage

Affiliation : Professeur des universités, Aix Marseille Université, UR 4671 ADEF. caroline.ladage@univ-amu.fr

Résumé : Les environnements numériques pour l'apprentissage utilisés en éducation et en formation font l'objet de nombreuses recherches dans une diversité de disciplines (psychologie, sociologie, sciences de l'éducation...). La dimension didactique y est peu présente, que ce soit pour étudier les praxéologies programmées dans l'environnement numérique ou pour comprendre leur articulation dans le déroulement du système didactique. La théorie anthropologique du didactique (TAD) est utilisée pour l'analyse didactique de ces environnements pour l'enseignement des mathématiques dans le système scolaire français. Afin de contribuer à une meilleure prise en charge didactique des environnements numériques en éducation, l'enquête menée s'appuie sur deux projets de recherche en France. Les résultats confirment l'intérêt de la TAD dans la compréhension des conditions de l'utilisation de ces outils et invitent à une vigilance épistémologique et didactique quant aux contenus véhiculés et la manière de les utiliser dans l'organisation de la classe.

Mots clés : environnements numériques pour l'apprentissage, théorie anthropologique du didactique, analyse didactique, analyse praxéologique

THE ATD IN THE RESEARCH ON DIGITAL LEARNING ENVIRONMENTS FOR MATHEMATICS LEARNING

Abstract: Digital learning environments used in education and training are subject of many research projects in a variety of disciplines (psychology, sociology, education sciences...). The didactic dimension is not often present in these researches, to study praxeologies programmed in a digital environment or to understand their articulation with a didactic system. The anthropological theory of didactics (ATD) is used as a framework for the didactic analysis of these environments, studied in the context of mathematics teaching in the French school system. The review of French-speaking scientific literature in the field of educational technologies confirms a rather small proportion of educational research in the field of didactics. To contribute to a better didactic approach in research on digital environments in education, this inquiry is based on the didactic analysis of two research projects. The results confirm the interest of ATD in understanding the current conditions of the use of these tools, while inviting epistemological and didactic vigilance regarding the content and the way they are used in the classroom.

Keywords: digital learning environments, anthropological theory of didactics, didactic analysis, praxeological analysis

INTRODUCTION

Le développement de l'informatique a donné lieu à l'introduction d'une diversité de technologies pour l'enseignement, comprenant aussi bien les ordinateurs, tablettes, tableaux blancs interactifs, que les plateformes sur Internet, ou encore les logiciels et applications dédiées... Chacune de ces technologies assure, d'une façon ou d'une autre, notre rapport aux informations qu'elles véhiculent. Parmi ces « technologies de l'information et de la communication » (TIC), certaines encodent les informations, d'autres les stockent, d'autres encore les transportent, etc. Pour faciliter la manipulation de l'information, organisation et communication, différents types de programmes et d'interfaces ont été développés, reconnaissables sous une diversité d'appellations (systèmes d'exploitation, programmes, logiciels, applications, moteurs de recherche... y compris Internet) et sous une forme plus ou moins intégrée (plateformes et environnements numériques...). La manière dont ces outils technologiques sont d'une part programmés et d'autre part utilisés influence la production et la diffusion des informations. Au regard de l'une des définitions de la didactique proposée par Yves Chevallard dans son approche anthropologique du didactique – « la didactique est la science des conditions et des contraintes de la diffusion (et de la non-diffusion) des praxéologies au sein des institutions de la société » (CHEVALLARD, 2010) –, il est indéniable que l'informatique, l'Internet et le numérique en général conditionnent cette diffusion et opèrent comme une formidable infrastructure de production et de diffusion de l'information. L'étude de ce qui nous est permis de savoir (ou pas) et la manière dont nous pouvons accéder à un domaine praxéologique particulier au contact des TIC dans la société en général, constitue une étape importante dans le travail du didacticien (LADAGE, 2008). Une telle étude permet notamment d'estimer la culture plus ou moins développée et plus ou moins accessible d'un tel domaine praxéologique et l'importance de l'existence de travaux en didactique pour le développement de cette culture et l'amélioration des conditions de sa diffusion.

Les technologies de l'information et de la communication appliquées à l'enseignement (TICE) et à l'apprentissage constituent un domaine aujourd'hui très développé dont les enjeux sont de taille. Entre attentes et réalités, les TICE¹ sont appelées à fournir des réponses aux questions et problèmes qui s'y posent, mais, confrontées à des contraintes de divers ordres (matériel et humain), elles sont loin d'y parvenir, ce qui ouvre la voie à de nombreuses critiques. Le rôle de la recherche scientifique sur les technologies en éducation est de ce fait évident, et il n'est pas surprenant qu'il se développe dans plusieurs champs disciplinaires, s'intéressant aux technologies numériques en général ou à un outil numérique² en particulier.

Dans cet article nous nous intéressons aux outils numériques qui proposent des environnements numériques d'apprentissage (ENA)³, dans un champ disciplinaire déterminé. La notion d'« environnement numérique d'apprentissage » (*digital learning environnement*) est utilisée dans la littérature pour décrire différentes configurations plus ou moins développées, allant des plateformes pédagogiques (du type Moodle) aux espaces de réalité virtuelle, en passant par certains jeux sérieux⁴. Il peut s'agir d'environnements simulant la réalité (un simulateur de vol d'avion par exemple), ou virtuels (un environnement qui imite les univers des jeux vidéo pour introduire des contenus à apprendre). Nous nous intéressons plus particulièrement aux environnements permettant à celui qui apprend, à l'instar des jeux vidéo, une immersion dans un monde virtuel en trois dimensions, qui suppose un cheminement et des

¹ Aujourd'hui nous rencontrons également la notion de « numérique éducatif » et de « numérique pour l'éducation », voir par exemple l'utilisation de la notion de « numérique » sur le site Internet du ministère de l'Éducation nationale de la Jeunesse et des Sports : <https://eduscol.education.fr/103/j-enseigne-avec-le-numerique> (en date du 1^{er} décembre 2020).

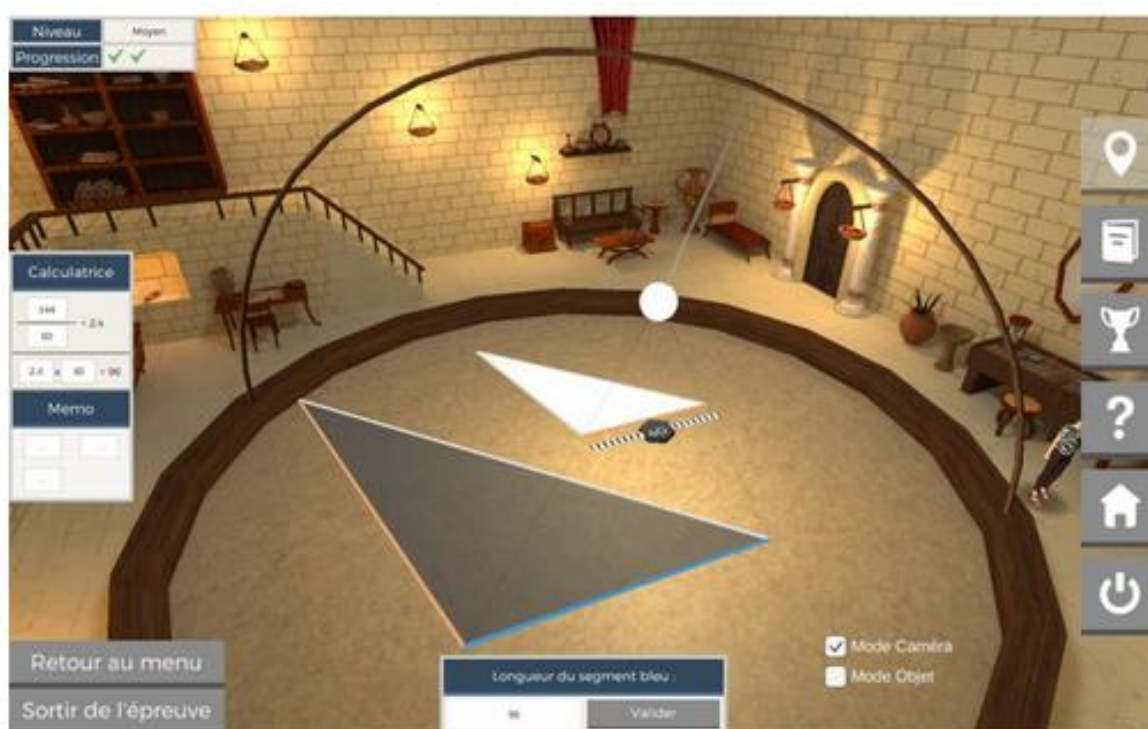
² Nous utiliserons dans ce qui suit les notions d'*outil* et de *numérique* afin de dépasser la multiplicité de dénominations en cours pour désigner la diversité d'applications informatiques.

³ La notion d'environnement numérique d'apprentissage (ENA) est employée par de nombreux chercheurs et professionnels, qui lui donnent autant de définitions qu'il s'agit d'étudier à chaque fois dans leurs contexte d'étude et de travail.

⁴ Pour une description détaillée de ces outils technologiques et de leurs types et contextes d'utilisation, voir le dossier « Jeux sérieux et mondes virtuels » proposé sur le site eduscol à l'adresse suivante : <https://eduscol.education.fr/numerique/dossier/apprendre/jeuxserieux>.

interactions pour atteindre des activités à réaliser. Ces environnements peuvent intégrer diverses fonctionnalités de présentation de contenus et proposent également des outils de communication et d'interactivité. Nous retenons la notion d'ENA pour désigner de manière générique le type d'outils numériques intégrant des contenus d'enseignement dans un environnement numérique simulé ou virtuel, associé à des fonctionnalités d'interaction avec cet environnement et, selon les cas, avec d'autres personnes qui y sont connectées (élèves ou enseignants). Le jeu sérieux SCOLA, sur lequel nous reviendrons plus loin, présente un tel environnement tel que l'illustre la figure 1 ci-après.

Figure 1 – Capture d'écran de l'environnement SCOLA



Ces environnements numériques facilitent les représentations multiples de l'information (image, vidéo, son, animation), permettent la programmation de différents niveaux de difficulté des tâches, l'explicitation d'objectifs et de règles associées aux activités, le suivi des actions

des utilisateurs, le retour d'information sur les tâches accomplies, la possibilité de répétition. Ils peuvent être présentés comme des environnements permettant l'individualisation des parcours d'apprentissage, ce qui consiste à présenter des contenus en fonction des résultats enregistrés à la suite de la réalisation d'épreuves dans l'environnement.

Dans le cadre de référence de la théorie anthropologique du didactique (TAD), nous étudions les ENA pour y repérer la nature des situations didactiques telles qu'elles ont été conçues, développées, expliquées et utilisées. Notre recherche s'inscrit dans le champ disciplinaire des sciences de l'éducation et de la formation, pour étudier dans une visée anthropologique la diffusion des connaissances et praxéologies humaines en général, sans distinction a priori d'une discipline en particulier. Elle est centrée sur l'étude des effets des technologies éducatives, d'une part sur les mécanismes de transposition didactique, et d'autre part sur le fonctionnement des systèmes didactiques qui les utilisent.

Le champ disciplinaire sur lequel porte l'enquête que nous présentons dans cet article est celui des mathématiques et le type de technologie éducative qui retient notre attention est l'environnement numérique d'apprentissage (ENA) proposant une immersion dans un monde virtuel. Nous nous intéressons aux ENA pour l'enseignement des mathématiques à destination de très jeunes élèves, pouvant être utilisés par des professeurs des écoles dans l'enseignement primaire⁵. Ces professeurs ont le plus souvent suivi une formation généraliste et sont non-mathématiciens. En nous intéressant à ce public en particulier, nous inscrivons notre recherche dans le prolongement de travaux menés en TAD sur les mathématiques des non-mathématiciens (CHEVALLARD, 2011b ; 2014 ; KIM, 2015).

Notre point de vue dans ce qui suit peut être précisé ainsi. Quiconque se penche de quelque façon que ce soit sur l'enseignement des mathématiques pénètre par là, fût-ce de façon éphémère, dans cette institution qu'Yves Chevallard a appelée la *noosphère* de l'enseignement

⁵ L'enseignement primaire en France accueille les enfants scolarisés de 6 à 11 ans. Les enseignements sont dispensés par un professeur des écoles dont il est attendu qu'il assure l'ensemble des disciplines du programme.

des mathématiques (CHEVALLARD, 1991). Mais il existe de nombreuses *positions* (au sens de la TAD) au sein de ladite noosphère. Une telle position est, bien entendu, celle de chercheur en didactique des mathématiques. Mais toute noosphère est semblable à un caravansérail où se côtoient, et quelquefois se rencontrent, des personnes y occupant d'autres positions, et qui y viennent en demeurant assujetties à une position institutionnelle dominante allogène – outre des professeurs de mathématiques « militants », il peut s'agir de psychologues, de sociologues, de spécialistes des technologies de l'information et de la communication, etc.

Dans ce qui suit, nous étudierons la manière dont la TAD peut intervenir dans l'abord des problèmes de l'apprentissage numérique (*digital learning*) tel qu'il est envisagé aujourd'hui de façon prédominante par des « noosphériens » *non didacticiens* de formation. Ce serait une autre étude, dont on ne trouvera ci-après que de rares éléments, que d'examiner l'intervention de la TAD dans le cadre même d'une didactique du *digital learning* encore largement à construire.

Cela précisé, quel est l'équipement praxéologique d'un enseignant de l'école primaire au sujet des ENA en mathématiques et que peut-il apprendre sur les usages didactiques de ce type applications ? A-t-il bénéficié d'une formation sur l'utilisation de ces outils dans la classe et quelle en était la nature ?

En France, depuis l'introduction en 2004 d'un « Certificat informatique et internet niveau 2 – Enseignant » (C2i2e) qui « atteste des compétences professionnelles dans l'usage pédagogique du numérique, indispensables pour les enseignants de l'enseignement scolaire, du supérieur, et pour les formateurs. » (MENSR, 2015), la formation intègre l'apprentissage des logiciels pour une utilisation en classe. Le C2i2e prévoit le développement de 28 compétences en informatique et internet⁶, parmi lesquelles la « B2 : Conception et préparation de contenus

⁶ Voir la présentation du C2i2e sur le site du ministère de l'Éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche : <https://c2i.enseignementsup-recherche.gouv.fr/etudiants/les-competences-du-c2i-niveau-2-enseignant-0>

d'enseignement et de situations d'apprentissage. », est le plus proche des situations didactiques que nous visons. Elle inclut en effet la compétence « B2.2 : Concevoir des situations d'apprentissage et d'évaluation mettant en œuvre des logiciels généraux ou spécifiques à la discipline, au domaine et niveau d'enseignement. » Dans le champ de l'enseignement des mathématiques, le programme de l'école primaire prévoit l'étude des mathématiques avec les logiciels pour la géométrie dynamique et l'algorithmique. Ces logiciels ne présentent toutefois pas l'ensemble des caractéristiques intégrées d'un ENA et de ce fait ne posent pas les mêmes questions didactiques.

Partant de l'évolution récente de ces environnements numériques, nous faisons l'hypothèse que l'utilisation en classe d'ENA dans le cadre de l'enseignement des mathématiques à l'école primaire manque de problématisation didactique, ce qui peut engendrer une méconnaissance de ces outils provoquant à son tour l'absence d'usage, voire des usages inadaptés.

Après avoir explicité le cadre de référence théorique en TAD, notre démarche d'enquête s'appuie sur l'étude de la recherche scientifique portant sur le numérique en éducation au sens large, pour y situer l'intérêt des recherches en didactique.

Notre questionnement est d'abord théorique, les deux projets de recherche que nous présentons dans la section 3 sont des contextes expérimentaux préexistants qui ont contribué à l'étude de la TAD comme cadre théorique de référence pour les recherches sur les environnements numériques d'apprentissage. Ils ne sont de ce fait présentés que de manière succincte, faute de place, et constituent des exemples de mises en œuvre possibles de la TAD qui permettent d'en dégager l'intérêt épistémologique et l'importance pour la formation. Le recul anthropologique en didactique nous invite à regarder ce qui se passe et se développe pour le comprendre dans son utilité et importance sociale.

LA TAD COMME CADRE THÉORIQUE POUR L'ANALYSE DES ENA

Le cadre théorique de cette recherche est constitué d'une sélection de théories constitutives de la TAD⁷, dont l'ensemble pourtant pourrait servir à analyser le phénomène à l'étude, mais que nous ne développons pas ici, faute de place. Nous proposons une présentation succincte de notre choix de théories constitutives de la TAD retenues pour étayer l'analyse des environnements numériques pour l'apprentissage, que nous illustrerons à l'aide de deux études de cas d'ENA en mathématiques, après avoir situé l'enquête didactique menée au regard de la littérature scientifique sur le sujet.

Les définitions du didactique comme outils d'analyse

Le premier outil conceptuel qui nous a servi à introduire et à problématiser le contexte de notre recherche sur les ENA, est la définition citée plus haut que Chevallard donne de la didactique comme science des conditions et contraintes de la diffusion des praxéologies dans la société. Une deuxième définition nous sert pour l'analyse didactique des ENA tels qu'ils peuvent être observés dans un système didactique donné, il s'agit de celle qui énonce que :

[...] il y a du didactique lorsqu'une personne ou une institution, se faisant par là agent didactique, fait quelque chose afin qu'une institution ou une personne « apprenne » un certain ensemble praxéologique, c'est-à-dire afin que cet ensemble arrive jusqu'à cette institution ou cette personne et finisse par s'intégrer à son équipement praxéologique. (CHEVALLARD, 2007, p. 717)

Cette définition nous donne un point de départ pour analyser la nature et l'intensité des élaborations didactiques observables, d'une part dans les ENA, d'autre part dans les situations

⁷ Pour l'étude de ces théories voir les *Leçons de didactique* de Yves CHEVALLARD (2011b) et les synthèses données dans le glossaire de l'ouvrage de BOSCH, CHEVALLARD, GARCÍA & MONAGHAN "Working with the Anthropological Theory of the Didactic in Mathematics Education: A Comprehensive Casebook" (2019).

didactiques dans lesquelles ils sont appelés à fonctionner. Une première étape de l'analyse peut consister en l'étude des phénomènes transpositifs existants ou à créer dans la conception et l'utilisation des ENA. L'analyse didactique est ensuite approfondie en suivant deux axes : le premier vise à identifier la fonction donnée à l'ENA au sein d'un système didactique (SD) en prenant appui sur la théorisation du fonctionnement de ce système à l'aide du schéma herbartien (CHEVALLARD, 2011b). Le deuxième axe vise à repérer les conditions et les contraintes de l'utilisation d'un ENA au sein d'un SD, en prenant comme cadre de référence « l'échelle des niveaux de codétermination didactique » (CHEVALLARD, 2011b).

La transposition didactique à l'œuvre dans la conception des ENA

La théorie de la transposition didactique (CHEVALLARD, 1991) peut servir à l'analyse des phénomènes transpositifs à l'œuvre dans la conception des ENA. Elle servirait à repérer les mécanismes de choix des contenus et de leur transposition dans l'environnement numérique. Elle aiderait à comprendre qui, ou quelle instance, est à l'origine des choix des contenus (et comment ils sont sélectionnés) ; qui les transpose (et comment) pour les adapter à l'environnement numérique ; qui teste le produit fini (et comment) ; quand (et comment) le processus transpositif reprend pour assurer l'actualisation des contenus. Elle questionnerait également le point de vue du travail de l'enseignant pour savoir quelles possibilités l'ENA offre pour l'intégration ou la prise en compte de ses propres choix de contenus. Selon le type d'environnement numérique, l'enseignant peut en effet sélectionner les contenus avec lesquels il souhaite que ses élèves entrent en contact grâce à un paramétrage du parcours à réaliser par l'élève dans l'environnement ou à la possibilité d'y ajouter des documents numériques.

Le schéma herbartien pour analyser les fonctions d'un ENA

Le schéma herbartien est introduit par Chevallard pour servir de modèle de référence à l'identification de différents types de configurations du fonctionnement d'un système

didactique (CHEVALLARD, 2011b, Leçon 3). Il sert pour représenter formellement la structure du processus didactique et se présente dans sa version développée de la manière suivante :

$$[S(X; Y; Q) \rightarrow \{R_1^\diamond, R_2^\diamond, \dots, R_m^\diamond, O_{m+1}, O_{m+2}, \dots, O_n\}] \rightsquigarrow R^\heartsuit.$$

Différentes schématisations peuvent être utilisées pour représenter le processus didactique, la topogenèse de ses acteurs, son milieu pour l'étude, son enjeu didactique, ainsi que le type de réponse résultant du fonctionnement du système didactique. Pour expliquer de manière succincte les symbolismes employés, partons d'un système didactique $S(X; y; \heartsuit)$, où X est un collectif d'élèves ou d'étudiants, y un « professeur » comme aide à l'étude et \heartsuit l'enjeu didactique au sujet d'un certain champ d'études. L'activité de ce système consiste alors à étudier des œuvres O regardées comme relevant du champ d'études considéré. Étudier une œuvre O c'est étudier des questions Q soulevées à propos de O . Étudier une question Q , c'est apporter à cette question une réponse R . Le bilan du travail d'un tel système didactique peut être schématisé ainsi : $S(X; y; Q) \rightsquigarrow R$. La version développée du schéma comprend la schématisation du *milieu didactique* ou *milieu pour l'étude* M et représente la structure du processus didactique que l'on rencontre dans la pédagogie de l'enquête (LADAGE & CHEVALLARD, 2011). Dans ce cas la schématisation invite à préciser les éléments constitutifs du *milieu pour l'étude* (de la question Q) en faisant apparaître la suite des réponses à la question Q étudiée provenant d'enquêtes réalisées par X et Y « dans la culture ». Ces réponses sont notées génériquement R^\diamond (ce qui se lit « r poinçon ») pour signifier qu'elles sont « estampillées » par une institution dont c'est la réponse R^\heartsuit à une question Q qu'elle a étudiée. Le milieu M s'écrira alors : $M = \{R_1^\diamond, R_2^\diamond, \dots, R_m^\diamond, \dots\}$. Notons que « parmi les réponses R^\diamond peut figurer une réponse R_y apportée par le directeur d'étude y ou encore la réponse portée par le manuel utilisé dans la classe (ou, aussi bien, par d'autres manuels) sans pour cela que ces réponses bénéficient d'aucun privilège » (LADAGE & CHEVALLARD, 2011). Dans la démarche de l'enquête chaque réponse R^\diamond est étudiée au cœur du système didactique pour estimer sa contribution à la

construction de la réponse R^\heartsuit . Pour cela il est parfois nécessaire d'avoir recours à des outils, que la TAD appelle plus largement des œuvres O et qui peuvent être aussi bien des théories, des expériences, des instruments, etc.). Lorsque le processus didactique intègre également des œuvres, la schématisation du milieu M s'écrit sous la forme suivante : $M = \{R_1^\diamond, R_2^\diamond, \dots, R_m^\diamond, O_{m+1}, O_{m+2}, \dots, O_n\}$. Nous retrouvons le milieu M du schéma herbartien développé reproduit plus haut.

Notons que le fonctionnement du système didactique sur le modèle de la pédagogie de l'enquête est aujourd'hui encore rare et que dans de nombreuses situations didactiques le système didactique est centré sur le cas où y propose sa propre réponse R_y . Le fonctionnement du système didactique consiste alors en la présentation à X et l'étude par X de R_y . Dans ce cas le système didactique $S(X; y; Q)$ se mue en système didactique $S(X; y; R_y)$, et le milieu M peut être schématisé de la façon suivante : $M = \{R_y, \dots\}$. Le schéma herbartien s'écrira alors : $[S(X; Y; Q) \curvearrowright \{R_y, \dots\}] \curvearrowright R_y$.

Considérons à présent l'analyse du processus didactique dans le cas de l'utilisation d'un ENA comme élément constitutif du milieu pour l'étude. Quelle est la fonction qu'un ENA est appelé à accomplir dans le fonctionnement d'un système didactique ? Dans le milieu pour l'étude (de Q) l'ENA figure-t-il comme R_y , R^\diamond ou comme une œuvre O utile à l'étude des matériaux à l'étude dans la construction de la réponse R ? La réponse à ces questions nécessite une étude approfondie de ces environnements, sachant que selon leur degré de développement ils peuvent intégrer l'ensemble des fonctions citées. Un environnement virtuel peut reproduire tout à la fois des éléments de nature, des informations issues de manuels, d'œuvres scientifiques, des outils de calcul, de simulation, etc. Il peut permettre la mise en œuvre d'exercices et d'expérimentations et offrir un *feedback* de l'activité de l'élève en temps réel. Il permet à l'élève de visualiser ses déplacements dans l'environnement virtuel à l'aide d'un personnage (souvent appelé « avatar ») dont il commande les déplacements et à partir duquel il peut basculer d'une vision de l'environnement à la première personne à une vision à la troisième personne. Sans rentrer ici plus avant dans le détail de la manière dont un ENA peut être

programmé, ces exemples invitent à questionner d'une part leurs paramétrages et d'autre part leurs fonctions dans l'organisation didactique.

Que ça soit sur le plan de la recherche scientifique ou de celui du travail du didacticien, nous interrogeons les objectifs déclarés de l'introduction d'un ENA dans un système didactique et les fonctions qui lui sont attribuées dans le milieu pour l'étude. Selon la complexité de l'ENA et les conditions de son utilisation, l'on peut également se demander s'il est attendu qu'il fonctionne comme un SD à part entière supposant l'autonomie de l'élève et dans laquelle *Y* serait absent, ou substitué par un personnage virtuel.

L'échelle des niveaux de codétermination didactique

La théorie dite de l'échelle des niveaux de codétermination didactique étudie les conditions et contraintes qui pèsent sur le didactique, et donne un cadre de référence pour approfondir l'analyse de ce qui est favorable ou de ce qui au contraire peut gêner la diffusion de praxéologies. Soulignons qu'il ne s'agit donc pas simplement d'identifier les conditions qui pèsent sur la diffusion des connaissances dans le cadre étroit d'une situation didactique donnée, mais d'approfondir l'analyse en étant attentif à ce qui peut déterminer le didactique à tous les niveaux de la société, de la civilisation, voire de l'humanité (CHEVALLARD, 2011b, Leçon 2). Associée à cette théorie Chevallard propose également les notions d'écologie et d'économie pour mettre en lumière les conditions d'un système didactique (leur écologie) par analogie aux systèmes (animés ou inanimés) existant dans le monde naturel ou social. La notion d'économie est alors employée pour désigner les gestes didactiques pouvant être introduits dans le système pour surmonter les éléments d'une écologie qui seraient défavorables au fonctionnement du système didactique.

La théorie de l'échelle des niveaux de codétermination didactique est une manifestation évidente de l'ambition de la TAD comme théorie du didactique à être une théorie *anthropologique* du didactique. La thèse de Sineae KIM (2015) réalisée sous la direction d'Yves Chevallard, offre à cet égard un exemple en didactique des mathématiques qui prend en

considération cette échelle pour expliquer des faits d'apprentissage ou de non-apprentissage des mathématiques à tous les niveaux de la société. Elle étudie les besoins mathématiques des non-mathématiciens à travers une sélection d'études d'écologie et d'économie didactiques des connaissances mathématiques. Voici comment Yves Chevallard explique l'enjeu de la thèse :

La problématique générale dans laquelle s'inscrit cette recherche vise à faire progresser notre connaissance fine de ce que l'on nomme en TAD l'économie et de l'écologie institutionnelles des connaissances mathématiques et scientifiques, que celles-ci apparaissent pour elles-mêmes ou, plus généralement, en relation avec des outils qui les mobilisent de façon explicite (comme dans certains modèles) ou incorporée (comme dans certains logiciels). (CHEVALLARD, 2011a)

La question posée dans la thèse est de savoir « dans quelles conditions et sous quelles contraintes, de telles praxéologies diffusent-elles ou ne diffusent-elles pas ». Cette mise en perspective intéresse l'analyse didactique des ENA en mathématiques à plus d'un titre. Premièrement, le fait que Kim réalise une étude de « l'écologie et l'économie de l'équipement praxéologique des personnes et des institutions en matière mathématique et scientifique ainsi que les dynamiques praxéologiques qui les modifient à court, moyen et long termes », nous invite à faire le lien avec l'analyse des ENA du point de vue des personnes et des institutions qui les conçoivent et les utilisent, mais aussi du point de vue de celles qui réalisent des recherches à leur sujet. La démarche de la thèse de Kim met en lumière toute l'importance de l'étude de l'équipement praxéologique des personnes et des institutions de tous ordres aux prises avec les connaissances mathématiques.

Deuxièmement, l'intérêt porté par Kim à l'analyse des outils (dont les logiciels) qui mobilisent les connaissances mathématiques et scientifiques, apporte à l'étude des ENA un exemple non seulement d'analyse des praxéologies mathématiques qu'un logiciel permet d'assurer (ou pas), mais aussi d'analyse des personnes et des institutions qui ont un rapport

personnel ou institutionnel à ces logiciels⁸. C'est ce deuxième point de vue qui nous intéresse pour formuler notre questionnement de la manière suivante : dans quelles conditions et sous quelles contraintes les ENA en mathématiques sont-ils utilisés dans les classes de l'école primaire en France et quelles sont les connaissances que la recherche scientifique produit à ce sujet ? Nous nous intéressons particulièrement aux ENA s'appuyant sur l'immersion dans un environnement virtuel.

Concernant les élèves, ce qui nous paraît enfin important à souligner au sujet de ce qui se passe dans les classes, est le rapport personnel qu'ils ont aux ENA.

Il faut [...] éviter de croire qu'au niveau local – celui de l'enseignant préparant son cours par exemple – le global puisse être ignoré. En effet, comme la théorie de la transposition didactique l'avait bien mis en évidence, le global pénètre souvent avec les élèves eux-mêmes dans la salle de classe, dont "l'isolation didactique" n'est ainsi jamais assurée. (LADAGE, 2015).

Il est de même important de comprendre les rapports personnels des enseignants comme constitutifs de conditions favorables ou non pouvant déterminer les usages des ENA dans un système didactique (LADAGE, 2017). Quelles connaissances ont-ils des ENA ? Quelles articulations dans le SD font-ils et pourquoi les font-ils ainsi ?

L'analyse praxéologique

Le troisième outil théorique de la TAD que nous utilisons est l'analyse praxéologique, pour repérer dans la dynamique des techniques et des praxéologies – ici de l'utilisation des ENA –, l'existence de discours sur les techniques mises en œuvre, dont l'objectif est de justifier, expliquer la technique pour la rendre intelligible. Dans la structure de la notion de praxéologie,

⁸ Avec les notions de « rapport personnel » et « rapport institutionnel » nous nous appuyons sur une autre théorie constitutive de la TAD : la théorie des rapports au savoirs (CHEVALLARD, 2003).

la technique répond à la question « Comment ? » (accomplir des tâches du type considéré), et c'est ensuite la question « Pourquoi ? » (cette technique marche-t-elle), qui appelle un discours sur la technique. L'analyse praxéologique a pour objectif de repérer le *logos* des personnes et des institutions sur les pratiques (*praxis*) et d'analyser le type de savoir (ou l'absence de savoir), quelle qu'en soit la nature (y compris ce qui pour certains ne serait pas considéré comme des savoirs).

Notre objectif est de repérer les discours personnels et institutionnels sur les ENA utilisés comme techniques d'enseignement des mathématiques. Nous verrons toute l'importance d'être attentif aux discours justificatifs de techniques, puisqu'ils doivent être suffisamment intelligibles pour les personnes et institutions qui sont amenées à mettre en œuvre les techniques. L'intelligibilité des discours sur les techniques est nécessaire pour assurer la compréhension de leur fonctionnement et leur raison d'être et détermine leur opérationnalité. À la lumière de l'analyse praxéologique, l'utilisation d'un ENA dans un système didactique peut être analysée en ces termes : comment l'ENA permet-il d'accomplir les tâches des praxéologies à faire apprendre par les élèves, et pourquoi cette technique marche-t-elle ? (Par exemple le calcul de la hauteur d'une pyramide présentée en trois dimensions dans l'environnement virtuel.) La manière dont les contenus sont organisés dans l'ENA, le nombre de parcours adaptés aux résultats de l'élève, l'interface graphique, les animations en trois dimensions (3D), la possibilité de travailler en réseau... sont autant de caractéristiques des ENA pouvant faire l'objet de discours argumentant les effets escomptés de son utilisation en éducation.

Sachant que chacun des composants d'une praxéologie donnée – type de tâches et technique (*praxis*) et discours justificatif (*logos*) –, est le fait d'une personne ou d'une institution, ils sont de ce fait plus ou moins partagés, plus ou moins développés. Le fait de faire travailler les élèves avec un ENA dans la classe peut ainsi pour certaines personnes ou institutions être justifié simplement pour son effet motivationnel, alors que pour d'autres il y a lieu de regarder de plus près les praxéologies réalisées. Les exemples de caractéristiques des ENA que nous venons de donner peuvent être considérés comme des facteurs favorisant les

apprentissages ou tout simplement la motivation des élèves. Ils peuvent être présentés comme une occasion utile pour l'élève d'être en contact avec le numérique (apprentissage citoyen du numérique), ou au contraire être regardés comme des distracteurs de son attention (nécessité de préserver l'élève du numérique). Voilà autant de discours justificatifs de l'utilisation des ENA que l'on peut trouver dans les médias et dans la littérature scientifique. Qui questionne le didactique dans les ENA, cela reste à voir.

L'analyse praxéologique de la conception et de l'utilisation des ENA, quel que soit le contenu de l'apprentissage visé, peut donc être utilisée d'une part pour identifier les types de tâche et techniques proposées dans l'ENA et d'autre part pour analyser la nature et la diversité des discours justificatifs qui les accompagnent, ou qui font défaut. Elle contribue ainsi à l'analyse des conditions et contraintes qui pèsent sur le didactique et peut être réalisée depuis plusieurs points de vue, celui des personnes et des institutions qui produisent ou utilisent les ENA (et les praxéologies effectivement mises en œuvre), celui aussi des chercheurs qui expérimentent l'efficacité de l'utilisation des ENA selon des critères déterminés par leur discipline de référence. Elle permet d'étudier plus largement le point de vue de la société, qui, elle, notamment à travers les médias et les pouvoirs publics, véhicule des discours sur les ENA qui contribuent au développement d'une culture plus ou moins favorable à leur utilisation raisonnée.

Dans la section qui suit nous partons d'exemples dans la littérature scientifique provenant d'abord de recherches sur le numérique en éducation en général, pour dégager ensuite quels sont les types de systèmes didactiques intégrant des ENA en mathématiques dont la recherche fait état et quels discours justificatifs peuvent être repérés.

ÉMERGENCE ET FRAGILITÉ DU CADRE DE RÉFÉRENCE DE LA DIDACTIQUE

L'utilisation du numérique en éducation est un objet de recherche complexe dont nous souhaitons d'abord esquisser le cadre général, pour ensuite souligner le faible niveau des analyses didactiques et la prégnance des recherches sur les dimensions pédagogiques et

motivationnelles avant d'aborder la recherche sur les ENA en mathématiques dans le cadre de l'école primaire.

Une spécialisation progressive de la recherche sur le numérique en éducation

Depuis le développement des technologies de l'information et de la communication (TIC), l'intérêt de leur utilisation en éducation et en formation⁹ a donné lieu à un grand nombre de recherches à partir de la fin des années 1980, jusqu'à produire en sciences humaines et sociales (et en particulier en sciences de l'éducation) des revues scientifiques dédiées¹⁰. Les objectifs que ces revues déclarent sont centrés sur ce qui est couramment nommé des « dispositifs informatiques », dont on étudie « la conception, la réalisation, la mise en œuvre, la validation, l'évaluation, l'apprentissage, l'usage » (STICEF, 2020). À titre d'exemple l'histoire de la revue STICEF (Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation) nous apprend que le lectorat visé initialement est constitué de professionnels de l'informatique et en méthodes pédagogiques, pour intéresser plus tard un public plus hétérogène de professionnels et de chercheurs dans une diversité de disciplines. La dimension pédagogique y occupe une place de premier ordre tandis que la dimension didactique y est moins discutée, même si on note dans la politique éditoriale de la revue STICEF l'annonce de l'intérêt pour des recherches en didactique.

Dans les revues généralistes sur le numérique en éducation, nous constatons effectivement une diversité d'approches disciplinaires (en psychologie, sociologie, sciences de l'information et de la communication, sciences de l'éducation...), et de contextes de recherche

⁹ Dans ce qui suit l'expression simplifiée (en éducation) est employé pour désigner les deux termes (éducation et formation).

¹⁰ Voir par exemple en français les revues suivantes : Apprentissage des Langues et Systèmes d'Information et de Communication (ALSIC) ; Distances et Médiation des Savoirs (DMS-DMK) ; Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation (STICEF) ; Frantic ; Adjectif.

(école, université, formation professionnelle, formation d'adultes, école inclusive...). La notion même de « technologies de l'information et de la communication », n'est pas unique, on rencontre aussi bien les notions d'informatique, de digital que celle de numérique, pour désigner un phénomène dont les pourtours sont aujourd'hui difficiles à définir tant du point de vue de la société en général, que du point de vue de la recherche. Il ne suffit plus de parler des effets des TIC en éducation ou des technologies numériques¹¹ en général, ces termes ne permettant pas d'analyser avec précision les conditions de leur utilisation. Il est de ce fait important d'encourager la recherche en éducation sur des objets numériques aux propriétés et contextes d'utilisation plus délimités. Dans les recherches plus récentes en éducation il est donc moins souvent question de numérique tout court et on voit s'introduire progressivement l'observation et l'expérimentation d'outils particuliers, du point de vue du matériel informatique (ordinateur, tablette, smartphone, tableau blanc interactif...), comme de celui des applications (logiciels, environnements virtuels, applications dédiées – y compris les jeux –, plateformes de ressources, moteurs de recherche...). Il va de soi que ces matériaux numériques peuvent être étudiés dans une grande variété de situations éducatives, intéressant de nombreuses disciplines, ce qui encourage aussi les recherches codisciplinaires, au sens de la TAD : « c'est-à-dire dans une synergie nécessaire avec des connaissances relevant d'une pluralité de juridictions disciplinaires, dont la question étudiée et son étude déterminent l'élection. » (CHEVALLARD, 2004).

Le niveau de la pédagogie prédomine

Il est à ce niveau de généralisation aujourd'hui difficile de dresser une revue de la littérature scientifique sur le numérique dont l'objet de recherche porte sur l'éducation ou la

¹¹ Par convenance c'est la notion de numérique qui est utilisée dans la suite de l'article.

formation, tant la quantité et la diversité de publications sont déjà très importantes. Ces publications sont cependant, comme le dit Brigitte ALBÉRO (2012) au sujet des enjeux pour les recherches sur les usages du numérique dans l'enseignement supérieur, « encore trop dispersées et insuffisamment cumulatives ». Différentes tendances fortes peuvent être dégagées en sociologie et en psychologie notamment, mais moins en sciences de l'éducation. Si un axe majeur se dégage de ces dernières, il concerne principalement l'étude des dimensions pédagogiques de l'intégration du numérique, faisant peu état des dimensions didactiques pour étudier comment le numérique transforme le rapport aux contenus enseignés. On retrouve ici le phénomène de refoulement du didactique identifié par CHEVALLARD (1997), lorsqu'il observe que « La réduction pédagogique se fonde en effet sur le postulat que le savoir étudié n'est pas problématique, que le problème tient tout entier dans le rapport des élèves au savoir, lequel à son tour est subordonné au rapport de l'élève au maître. » C'est le cas des recherches sur le numérique qui ne s'intéressent qu'aux dimensions motivationnelles, qui dans bien des cas se révèlent être des mythes et non des réalités¹².

À l'inverse, pour donner un exemple de recherche dont les dimensions didactiques sont bien prises en compte, on peut citer l'étude menée par FLUCKIGER, BOUCHER et DAUNAY (2016), au sujet de l'influence de ce que ces auteurs nomment « tableau numérique informatique » (TNI) sur le choix réalisé par l'enseignant des types de ressources employées dans la classe. En se référant aux travaux de GUEUDET et TROUCHE (2008) sur le travail documentaire des enseignants dans la préparation des cours, la recherche met en lumière que « la technique n'est jamais loin » dans le choix des contenus et la mise en forme des documents, pour les adapter au TNI. De même lorsqu'un enseignant peine à maîtriser la dimension technique il sera plus enclin à s'appuyer sur des documents existants que d'en créer lui-même

¹² Voir à ce sujet dans la collection « Mythes et réalités » le numéro d'AMADIEU et TRICOT : Apprendre avec le numérique (2014).

ou d'adapter ceux qui existent, selon une diversité de techniques que FLUCKIGER et al. décrivent (changement d'image, surlignement, etc.).

Quelle que soit la raison (technique ou didactique) de l'adaptation de documents destinés à être utilisés avec le TNI, cette recherche intéresse notre analyse didactique des outils numériques en éducation, dans la mesure où elle donne un exemple très clair du phénomène que nous avons cité dans l'introduction, à savoir l'influence sur la production et la diffusion des praxéologies de la manière dont les outils technologiques sont programmés et utilisés. En termes de conditions et contraintes elle constitue également un exemple de contrainte qui pèse sur le fonctionnement du système didactique du fait, d'une part du temps nécessaire à l'adaptation des contenus d'enseignement au TNI, et d'autre part du niveau de technicité de la tâche qui n'est maîtrisée que par une partie des enseignants. L'étude du fonctionnement du système didactique au regard du schéma herbartien fait apparaître quant à la construction du milieu pour l'étude auquel contribue l'utilisation du TNI, un rôle important de l'enseignant et une absence, voire faible participation de l'élève dans le choix des contenus. Du moins elle n'est pas mentionnée dans le récit de la recherche et serait à questionner.

ENA et mathématiques

L'étude de la littérature scientifique sur les ENA dans les revues spécialisées en enseignement des mathématiques fait sans surprise apparaître l'existence de recherches insistant sur l'importance de la prise en compte des dimensions didactiques dans la conception des environnements numériques et, concernant l'école primaire, plus particulièrement des jeux, comme l'illustre le numéro spécial (N° 231) sur le jeu pour l'enseignement des mathématiques de la revue Suisse RMé (Revue de Mathématiques pour l'école¹³).

¹³ Voir le site Internet de la revue : <https://www.revue-mathematiques.ch/>.

Nous avons centré notre enquête sur les revues généralistes dont le lectorat ciblé ne s'inscrit pas dans une didactique disciplinaire spécifique. À l'instar de la thèse de Kim, qui étudie les besoins mathématiques des non-mathématiciens à travers une sélection d'études d'écologie et d'économie didactiques des connaissances mathématiques, nous nous intéressons particulièrement aux recherches réalisées sur les ENA en mathématiques dans les classes de primaire où l'enseignement des mathématiques n'est pas assuré par un professeur spécialisé en mathématiques, mais par des professeurs des écoles dont la formation est pluridisciplinaire.

Nous constatons toutefois que la littérature sur les ENA en mathématiques utilisés dans le cadre de l'école primaire est peu développée dans la littérature plus généraliste en sciences de l'éducation. Notons toutefois que différentes recherches intéressent de manière plus ou moins directe le thème du numérique dans l'enseignement des mathématiques et certains travaux proposent des questionnements proches de l'enquête que nous menons sur les ENA. Il s'agit par exemple des travaux de GUEUDET et TROUCHE (2008) portant sur le travail documentaire des enseignants. Parmi une diversité de ressources, ces auteurs analysent le rapport des enseignants aux logiciels, par exemple de géométrie dynamique, et leur utilisation dans l'organisation didactique. Pour une enseignante interrogée dans le cadre de cette recherche, le discours justificatif est par exemple que le logiciel aide à « compléter la démonstration par l'observation visuelle permise par la figure animée ; cette observation [...] permet aux élèves d'une part de bien comprendre la situation, et, d'autre part, d'être convaincus de l'invariance du rapport. » La recherche de Gueudet et Trouche démontre déjà en 2008 l'importance d'étudier la manière dont les enseignants de mathématiques du secondaire intègrent dans leurs cours les environnements technologiques, au sujet desquels il faut préciser qu'il s'agit alors de calculatrices et de logiciels de type Géoplan et Mathenpoche. Rappelons ici que les ENA que nous étudions une dizaine d'années plus tard, diffèrent des logiciels de ce type – du moins tels qu'ils ont été analysés par ces auteurs à l'époque –, du fait des activités attendues de l'élève dans l'environnement, dont les caractéristiques qui nous intéressent sont plus particulièrement la présence d'un environnement numérique qui attend de l'élève, à l'instar

des jeux vidéo, une immersion dans un monde virtuel en trois dimensions, qui suppose un cheminement et des interactions pour atteindre des activités à réaliser.

L'enquête menée dans les revues généralistes permet de conclure à une faible présence de l'analyse didactique du recours aux ENA pour l'apprentissage des mathématiques à l'école primaire, ce qui nous conduit au constat d'un déni du didactique qui marque le récit de certaines ces recherches. Alors même que l'objet de l'apprentissage se trouve explicité, les praxéologies mathématiques elles-mêmes et les gestes didactiques sont peu ou pas discutés, pour laisser la place à l'étude de scores motivationnels ou de performance dans les évaluations, sans prise en compte des dimensions didactiques. Un exemple à ce sujet peut être pris dans la littérature anglo-saxonne qui ne propose également qu'un faible nombre de recherches portant sur les ENA utilisés à l'école primaire. C'est le constat que confirment OUTHWAITE, GULLIFORD et PITCHFORD (2017), qui présentent dans la revue généraliste *Computers & Education*, une recherche en psychologie sur l'utilisation à l'école primaire d'applications combinant jeu et apprentissage des mathématiques sur des tablettes numériques (*technology-based educational mathematics games*). Si ces auteurs insistent sur l'importance, d'une part de l'adéquation des contenus de l'application avec le curriculum scolaire, et d'autre part de l'intégration du jeu dans l'organisation de la classe, leurs travaux sont menés en référence aux méthodes de recherche en psychologie et basent leur étude sur l'évaluation des performances des élèves avant et après avoir réalisé une sélection de jeux de mathématiques sur tablette. Les auteurs recueillent des résultats nettement positifs touchant l'effet de l'utilisation des jeux à l'aide de 50 questions tirées des applications, évaluant les connaissances du programme national de mathématiques. Pour OUTHWAITE et al., le bénéfice du jeu se situe dans les retours d'information proposés quant à la réussite ou non d'une tâche (feedback positif ou négatif), et plus largement dans la possibilité offerte à l'élève qu'il répète les tâches et les consignes des tâches.

Si l'article présente en détail le dispositif méthodologique, impliquant des groupes expérimentaux et des groupes témoins, les auteurs font cependant très peu état des contenus programmés dans les jeux, au sujet desquels ils se contentent de dire qu'ils ont été développés "by an education publishing non-profit organisation" en donnant la description suivante :

The apps offer child-centred tuition focusing on the core mathematical concepts of Number, Shape, Space and Measure covered in the UK national curriculum. Each app presents a series of topics that are focused on particular skills, such as, Patterns and Shape, Counting 1 to 10, and Add and Take Away. Each topic has a detailed set of activities designed to introduce children progressively to a particular mathematical concept. A virtual teacher scaffolds children's learning with clear instructions and demonstrations. (OUTHWAITE et al.

La recherche se focalise ensuite sur les types d'évaluation à mettre en place pour évaluer les connaissances en mathématiques en variant les questions posées et leur support sur tablette ou papier. Cet article ne donne donc que peu de place aux dimensions didactiques : le choix des contenus avec lequel l'élève est en contact, la manière dont ce contact est organisé dans l'environnement numérique, la mise en forme numérique des objets mathématiques, etc., ne sont pas questionnés. Pour ces auteurs la légitimité et la pertinence des contenus sont considérées comme réglées d'avance, au sein d'autres institutions, et ne semblent pas les interpeller comme éléments pouvant influencer l'utilisation et l'efficacité des jeux. Il n'est pas non plus fait état du rapport de l'enseignant aux contenus des jeux, qui opèrent ainsi davantage comme un système didactique auxiliaire plutôt opaque, destiné à renforcer le fonctionnement du système didactique principal pour le développement sans distinction de compétences de base en mathématiques.

La littérature scientifique en langue française dans le champ des technologies éducatives ne présente qu'une très faible proportion de recherches en éducation s'inscrivant dans le courant de la didactique, alors que nous faisons l'hypothèse que les recherches en didactiques des mathématiques publiées dans des revues spécialisées peinent à intéresser des publics de non-mathématiciens et plus particulièrement les professeurs des écoles enseignant à l'école primaire. La pénurie des recherches en didactique sur les ENA en mathématiques à destination d'un public de non-mathématiciens témoigne d'un déni de problématique des contenus véhiculés dans les jeux sérieux, qui peut résulter du choix du cadre de référence théorique pour les étudier. L'hypothèse est faite que c'est une des raisons pour lesquelles il est difficile de se

prononcer sur l'efficacité de ces jeux, sans prendre en compte les conditions et contraintes qui pèsent sur leur conception et leur utilisation par les enseignants et les élèves.

Le cloisonnement disciplinaire dont témoigne la production scientifique sur les ENA en mathématiques – voire sur les ENA en général – risque de ne pas faire bénéficier le public d'enseignants non-mathématiciens des connaissances essentielles à leur métier. Au risque également que ces enseignants rencontrent plus aisément des publications dans d'autres domaines scientifiques que ceux des mathématiques, ce qui constitue en soi une contrainte majeure à leur utilisation efficiente.

L'importance d'une prise en compte des dimensions didactiques dans la conception et l'utilisation des ENA nécessite un cadre théorique de référence permettant l'observation des multiples dimensions de ces environnements. La TAD offre un tel cadre, aussi bien pour analyser le didactique que pour identifier ce qui conditionne et contraint le didactique, ce qui implique de pouvoir s'appuyer solidairement sur les recherches scientifiques de différentes disciplines, dont les résultats peuvent se compléter ou se questionner mutuellement. Dans ce qui suit, nous présentons un projet d'une recherche sur les ENA en mathématiques dans lequel nous analysons les conditions et contraintes d'une telle démarche scientifique.

PROJETS DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT D'ENA DE MATHÉMATIQUES

La recherche menée sur les ENA en mathématiques s'inscrit dans un programme de recherche au sein du laboratoire ADEF de l'université Aix-Marseille, que nous menons dans une perspective plus large qui part de l'hypothèse que les technologies numériques questionnent la didactique et que réciproquement la recherche en didactique se doit de questionner l'utilisation du numérique en éducation et en formation. L'un des thèmes porte sur les environnements numériques d'apprentissage (ENA) qui a déjà fait l'objet de deux projets de recherche, le projet SCOLA (2016) et le projet ANIPPO (en cours de 2019 à 2022), que nous présentons brièvement ci-après pour en dégager les éléments intéressant l'analyse didactique.

Le public scolaire visé dans le projet SCOLA sont les élèves de la classe de 6^e du collège (premier niveau de l'école secondaire en France, dont les élèves ont entre 11 à 14 ans), qui ne constituent donc pas directement le public qui intéresse l'enquête sur les ENA pour l'école primaire, la structuration de l'enseignement français en cycles, dont un cycle constitué des classes de cours moyen 1^{re} et 2^e années et de la classe de 6^e, légitime néanmoins cet exemple. Nous en présentons une sélection de résultats dans la mesure où ils influencent notre travail de recherche dans l'analyse des travaux de conception et de déploiement du projet ANIPPO (présenté dans un deuxième temps), qui est destiné aux élèves des classes des cours moyens (CM 1 et 2) de l'école primaire (9 à 11 ans). Nous continuerons à utiliser la notion d'environnement numérique d'apprentissage (ENA) par commodité, même si la documentation des projets emploient une terminologie différente.

SCOLA : Système de Communication Ouvert et Ludique pour les Apprentissages

Le projet SCOLA ou Système de Communication Ouvert et Ludique pour les Apprentissages a été sélectionné par la direction générale de l'enseignement scolaire du ministère de l'Éducation nationale français, et était financé par la Caisse des dépôts et consignations pour une durée de trois ans. Un consortium a été formé pour la mise en œuvre de ce projet, composé, pour la partie représentant le secteur privé, par la société ARIES, école d'enseignement spécialisée dans la création d'applications en réalité virtuelle, du Data Center AGIIR Network, de la société de production de *serious games* IDEES3COM et de trois laboratoires : ADEF (Aix-Marseille Université), IRIT (Université de Toulouse) et OUN (Université de Franche-Comté). Le rectorat de l'académie d'Aix-Marseille a fourni le terrain d'expérimentation ainsi que les équipes d'enseignants-concepteurs des contenus.

Le projet présente un environnement numérique en réseau, accessible sur Internet, organisé autour de plusieurs jeux sérieux pour l'apprentissage du français et des mathématiques, qui sont articulés avec un système d'information alimenté de contenus disciplinaires en lien avec les jeux, un module d'évaluation et des classes virtuelles. Les classes virtuelles ont pour

objectif de permettre aux élèves de s'entraider ou à l'enseignant de réunir un ou plusieurs élèves.

L'ENA SCOLA a tout du point de vue de sa conception pour répondre aux caractéristiques d'un système didactique faiblement aidé, du fait de l'interactivité entre l'élève et l'environnement, qu'il parcourt librement et dans lequel il rencontre des activités à réaliser pour avancer dans les niveaux programmés dans le jeu. Comme pour beaucoup de jeux sérieux de ce type, les consignes et explications sont données par des personnages virtuels. L'environnement permet en outre la discussion entre les élèves via un espace de messagerie instantanée (*chat*) et de classe virtuelle, et l'élève peut consulter la base documentaire alimentée par son enseignant pour revoir ses cours, nécessaires à la réalisation des activités. Le rapport de l'élève à Scola permet de ce fait une certaine interactivité avec le système didactique de la classe du fait des échanges entre élèves et la consultation de la base documentaire. Le rapport de l'enseignant à SCOLA est également favorisé du fait qu'il peut alimenter la base documentaire et organiser une classe virtuelle. L'objectif de cette configuration était de ne pas laisser l'élève dans une situation d'essai-erreur pour tenter de progresser dans le jeu là où il n'était pas parvenu à réussir l'activité. Différentes configurations du système didactique sont ainsi possibles. Il peut s'agir d'un système autodidactique $S(x, \emptyset, Q)$, au sein duquel l'élève réalise un certain nombre d'activités au même titre qu'un devoir réalisé à la maison. Si plusieurs élèves y jouent en même temps et échangent au sujet de leurs activités dans le jeu on écrirait $S(x_1, x_2, \dots, x_n, \emptyset, Q)$. Selon le paramétrage du jeu, on peut cependant considérer que les personnages virtuels, programmés de manière plus ou moins sophistiquée pour guider les actions de l'élève dans l'environnement, jouent un rôle d'aide à l'étude. Le système didactique peut dans ce cas être présenté par le schéma suivant : $S(x_1, x_2, \dots, x_n, Y_v, Q)$, où Y_v représente les aides à l'étude incarnées par les personnages virtuels présents dans le jeu (exemple le personnage de Thalès dans l'activité de découverte du théorème de Thalès, présentée dans la figure 2).

Figure 2 – Capture d'écran du « trailer » du jeu sérieux SCOLA.



Si on considère à présent le moment où le jeu est utilisé on peut distinguer différentes fonctions : il peut d'abord être utilisé comme un outil pour réaliser des exercices au titre d'un système didactique auxiliaire (SDA) pendant ou en dehors du temps scolaire. Il peut aussi être intégré dans l'organisation didactique du système didactique principal (SDP) de la classe au titre d'une R^{\diamond} (par exemple si on suit l'histoire de Thalès racontée dans l'environnement), mais aussi d'une œuvre O , si par exemple le professeur invite les élèves au cours du SDP à utiliser les outils du jeu pour calculer la hauteur d'une pyramide qui s'y trouverait représentée.

Les observations que nous avons menées en classe lors de la phase d'expérimentation, les questionnaires et entretiens réalisés auprès d'une trentaine de professeurs ayant testé SCOLA dans dix collèges à la fin de la phase finale de conception du projet en 2016, font ressortir des résultats marquants à partir de quatre points de vue :

- **La logistique de l'ENA.** Malgré d'énormes efforts humains et financiers déployés pour neutraliser les problèmes techniques, l'utilisation de SCOLA a beaucoup souffert de problèmes de connexion à la plateforme à distance, de chargement et d'affichage, ce qui a

découragé son déploiement à grande échelle et rendu le travail des enseignants et des chercheurs parfois très complexe et infructueux.

- **Le matériel informatique.** Le choix du matériel informatique dans la construction du milieu pour l'étude en classe apparaît comme une condition majeure pouvant déterminer le déroulement du système didactique. Devant un ordinateur dans une salle informatique plusieurs enseignants déclarent avoir plus de mal à maintenir une progression partagée au sein de la classe (SDP), du fait de l'avancement plus ou moins rapide des élèves dans l'environnement, ce qui en cas d'attente les invitait d'en explorer d'autres lieux, les détournant ainsi de l'activité programmée par l'enseignant. L'un des enseignants, qui faisait partie des concepteurs des contenus des activités, a utilisé SCOLA avec les élèves sur des tablettes de façon ponctuelle en classe ordinaire (et non pas en salle informatique). Cet enseignant (E1) déclare que ces utilisations au sein du SDP étaient de ce fait plus fréquentes que si elles avaient été organisées en salle informatique. Pour lui l'intégration en salle de classe avec des tablettes fonctionne beaucoup mieux que lorsque les élèves doivent se rendre en salle informatique. Il utilise SCOLA de manière techniquement très poussée, articulant jeu sérieux sur tablette avec un tableau blanc interactif (TBI) dans une réelle intégration du travail avec le jeu dans le déroulement de l'enseignement en cours dans la classe :

Quand on utilise les tablettes, il y a beaucoup plus de fluidité, on a une orchestration instrumentale avec le TBI et du coup, quand les élèves sont sur le jeu sur leurs tablettes, on peut envoyer des images sur le TBI pour voir ce qu'ils sont en train de faire, on peut les récupérer, leur faire ranger la tablette, regarder les images du jeu au tableau pour faire des impressions de portions d'écran, et traiter ça dans un cahier, dans le cahier sur Thalès. On pouvait partir de la configuration dans laquelle ils étaient en train de jouer, arrêter le jeu sur le tableau, récupérer les images du jeu et les schématiser. Après on développe, on peut dérouler une partie du cours là-dessus.

Du point de vue de l'instrumentation en classe, sortir un cahier ordinaire sur la même table qu'un clavier dans la salle informatique, c'est plus difficile. L'objet ordinateur est plus gros que l'objet tablette. Le passage en salle informatique provoque une discontinuité dans le travail. Quand on utilise la tablette on gagne sur le côté sérieux du jeu sérieux, il s'agit de quelque chose qu'on fait dans la salle de classe, pas qu'on va faire ailleurs pour s'amuser. (E1)

Un autre témoignage – également issu d’un entretien avec un enseignant (E2) ayant participé à la conception et à l’expérimentation du jeu – intéresse la question de l’articulation de l’utilisation de SCOLA avec le cours (SDP) :

Lorsqu’il s’agissait de calculer la hauteur de la pyramide, nous avons pu observer que seuls cinq élèves prenaient du papier et une calculatrice. La grosse difficulté que j’ai vue c’est le retour à l’écrit, c’est-à-dire que là où il y a des calculs à faire, il faut sortir autre chose que l’ordinateur, c’est pour les élèves... c’est l’idée que je suis devant un ordinateur donc surtout je n’écris pas et c’est violent pour eux [...] sortir une feuille c’est sortir de l’immersion. Le passage à l’écrit complète le travail avec le jeu, même si c’est perçu comme violent pour les élèves. (E2)

- **La perception du travail des élèves.** Dans le prolongement du point de vue précédent les retours que les enseignants font de leur vécu de l’utilisation de SCOLA avec des groupes d’élèves témoignent de difficultés de différents types, aboutissant à une grande hétérogénéité de situations, qui dépendent de la manière dont SCOLA a été intégré (ou non) dans l’activité de la classe, du rapport de l’élève aux contenus disciplinaires, de la compréhension des règles du jeu, de l’environnement numérique lui-même et de l’ordinateur ou de la tablette.

Il y a différents types de réactions. Je pense quand même qu’il faut que les élèves soient motivés par la recherche, qu’ils aient envie de réussir, de trouver la solution. Il y a des élèves qui malgré leurs difficultés ont envie d’avancer, trouvent des stratégies, même si ce n’est pas forcément ce qui était attendu dans le jeu. Et puis pour d’autres que ça énerve de ne pas comprendre tout de suite, ça dépend de leurs niveaux aussi bien en français, en compréhension des consignes, comme en mathématiques et puis aussi de leur motivation. Il y a beaucoup d’élèves maintenant qui, s’ils ne voient pas la réponse ou le calcul à effectuer tout de suite, ils appellent directement le professeur. (E2)

- **La diffusion des résultats de la recherche.** La production finale de SCOLA a été marquée par ces différentes contraintes qui ont rendu la diffusion à un public large problématique. Parmi les préconisations que nous avons formulées dans le rapport final de l’évaluation de l’ENA SCOLA – tel qu’observé dans sa version destinée à une commercialisation et à la suite des témoignages recueillis par questionnaire et enquête auprès

des enseignants – la suivante apparaît pour nous importante à retenir pour des projets de ce type :

Comme il est souvent noté dans la littérature, une difficulté majeure rencontrée dans la conception de ce type de dispositif est son utilisation par des personnes qui n'ont pas fait partie de l'équipe d'enseignants concepteurs. Il y a donc lieu, pour garantir la diffusion plus large et durable de SCOLA, de réfléchir à des conditions de diffusion spécifiques à ces publics-là. Ici encore on peut souligner l'importance de la constitution de groupes d'intérêts et de communautés de pratiques pour développer des utilisations partagées et étudier au sein de ces communautés les conditions et les contextes d'utilisation favorables pour faire vivre la plateforme avec ses « épreuves », ses ressources, ses fonctionnalités. (LADAGE & RAVESTEIN, 2016)

Ces différents axes d'analyse des situations de classe engendrées par l'intégration de SCOLA confirment ce dont font état différentes recherches, mais constituent des contraintes majeures pour l'amélioration et le développement des ENA tenant compte des exigences didactiques de leur utilisation. Les enseignants intégrant les ENA en classe n'ont souvent qu'une faible connaissance des contenus disciplinaires présents dans ces environnements numériques. Non seulement ils n'ont que rarement joué eux-mêmes à ces jeux, mais en plus il leur est souvent difficile de connaître avec précision les praxéologies qui y sont intégrées. La documentation est généralement lacunaire et ne permet pas une consultation aisée. Le contact avec les concepteurs n'est pas encouragé et ce d'autant plus lorsqu'on est professeur des écoles. Ce sont ces exigences que notre cadre de référence de la théorie anthropologique du didactique vise plus particulièrement dans notre contribution au déploiement du projet ANIPPO.

ANIPPO : Application immersive pour la résolution de problèmes ouverts

ANIPPO est un projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche en France (ANR)¹⁴. Il réunit des chercheurs de différents horizons scientifiques pour étudier l'appropriation de l'environnement ANIPPO dans le développement des stratégies cognitive et métacognitive pour la résolution de problèmes ouverts en mathématiques au primaire. L'argumentaire scientifique part de cadres théoriques de référence pluriels situés :

1) en sémiotique interprétative (développés notamment par Pacurar, 2016), pour analyser les niveaux de perception fonctionnelle, sémantique du logiciel 3D (niveau de compréhension de propriétés sémiotiques des environnements numériques) et leur lien avec la compréhension des contenus qui y sont intégrés ;

2) en sciences cognitives pour l'analyse des effets motivationnels d'une mise en situation en environnement immersif 3D pour favoriser l'engagement dans des tâches de résolution de problèmes ouverts ;

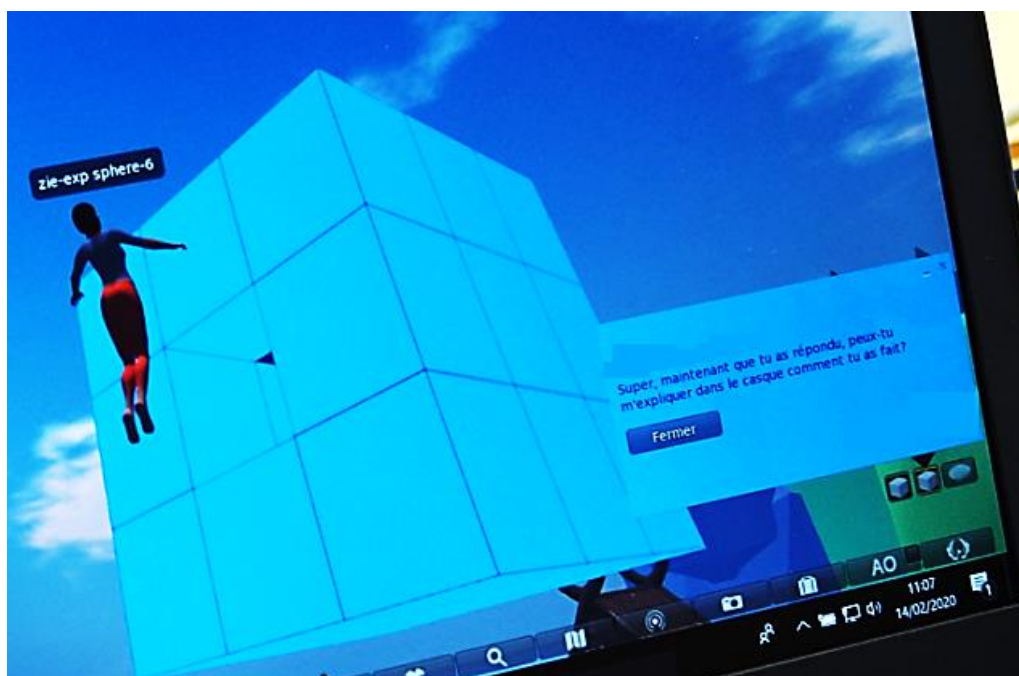
3) en didactique, d'une part pour étudier comment – grâce à l'immersion dans l'environnement 3D, perçu comme une situation adidactique en référence à Brousseau (1987) – le renforcement de la situation adidactique facilite la transition de stratégies de résolution d'essais-erreurs à des stratégies procédurales élaborées à partir des savoirs mathématiques impliqués ; et d'autre part pour l'analyse en TAD des conditions de diffusion des praxéologies mathématiques et des contraintes pouvant émerger quant à l'utilisation de l'ENA par les élèves et les enseignants, mais aussi quant à la recherche pouvant être menée à son sujet en sciences de l'éducation.

Pour donner une idée de la nature de l'environnement ANIPPO, sur la figure 3 ci-après on trouve un exemple de représentation en 3D d'un cube dont l'élève doit compter le nombre

¹⁴ Voir la présentation du projet sur le site de l'ANR : <https://anr.fr/Projet-ANR-18-CE28-0002>

de petits cubes qui le constituent, sachant qu'au centre certains cubes ont été enlevés. On aperçoit le personnage que l'élève fait bouger à l'aide du clavier et qui le permet de se déplacer dans l'environnement, voire de rentrer à l'intérieur du cube. Un message apparaît dans l'interface lui demandant d'expliquer à voix haute sa démarche de construction de la réponse à la question posée.

Figure 3 – Photographie de l'écran d'un élève lors de la première phase d'expérimentation d'ANIPPO



Les travaux d'ADEF s'inscrivent dans ce dernier axe dans le prolongement des questionnements développés dans cet article. Le projet n'en est qu'à ses débuts et le déploiement des expérimentations sur le terrain n'a pas encore eu lieu dans la région d'Aix-Marseille. Deux résultats intermédiaires se dégagent de la phase de conception du dispositif de recherche : tout d'abord l'importance des travaux en didactique dans une approche anthropologique solidairement aux travaux en didactique des mathématiques afin de prendre en

compte les conditions d'utilisation de l'ENA dans le cadre scolaire ; ensuite les questions que pose la conception d'un dispositif de recherche en didactique auquel sont associées les approches méthodologiques d'autres disciplines. Le recueil de données pour la mesure d'un effet motivationnel n'est pas le même que le recueil des discours des élèves justifiant leurs praxéologies dans la résolution des problèmes ouverts au sein de l'environnement. Face à la difficulté de recueillir les discours des élèves explicitant les procédures de leur raisonnement dans la résolution des problèmes mathématiques, différentes stratégies vont être expérimentées du point de vue des méthodes de recueil des données.

Les travaux menés dans les classes de deux villes françaises par certains membres du projet ont déjà fait ressortir la difficulté de mesurer l'impact de l'utilisation d'ANIPPO sur les apprentissages en mathématiques. Ils constatent même que

the situation in the ANIPPO environment appears very playful, to the point that many students seem to forget the initial problem-solving objectives: some students have fun exploring the environment and playing hide and seek between avatars as evidenced by audio exchanges between students. To help the pupils to persist in the problem-solving task, the virtual environment will be simplified to make it less distractive and regular reminders on the problem-solving task will be broadcast (audio and video) in the environment. (Pacurar, Magot, Cabassut, & Solon, 2020).

Ces premiers résultats conduisent à adapter l'ENA et les méthodes de recueil de données. Cette possibilité d'ajuster aussi bien l'ENA que le dispositif de recherche paraît un atout majeur du projet ANIPPO. Le fonctionnement en équipe pluridisciplinaire, y compris pour la programmation de l'environnement numérique, est ainsi essentiel pour le déploiement de projets de recherche, y compris pour rendre la production utilisable au-delà de la durée du projet de recherche.

DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats de l'enquête menée dans la littérature scientifique, centrée sur les revues généralistes étudiant le numérique en éducation, portent à croire que les contenus des logiciels et des espaces numériques et virtuels d'apprentissage (ENA) sont une boîte noire pour

l'enseignant qui n'en est pas le concepteur et qui décide de l'intégrer dans le programme de travail de sa classe. Il faut noter un biais possible dans ce constat dans la mesure où les recherches qui décrivent le rapport de l'enseignant à ces outils s'adressent souvent aux enseignants ayant participé au projet ou ayant répondu favorablement à la sollicitation des chercheurs d'expérimenter l'outil. On peut alors se demander quel est leur rapport initial à ces outils, s'il est construit durant leur formation initiale ou après, une fois qu'ils sont en poste. Le recours à ces applications nécessite encore aujourd'hui une instrumentation et une logistique telles que l'initiative personnelle d'un enseignant peut s'en trouver découragée.

Dans le cas de SCOLA les résultats des recherches ont également mis en lumière que lorsque l'enseignant n'y joue pas lui-même et n'en connaît pas le processus de conception, il le considère plus souvent comme un répéteur et un outil favorisant la motivation, sans lui donner une véritable fonction dans le système didactique. La fonction que l'ENA reçoit dans le SD est alors minimale et peu questionnée, voire renvoyée systématiquement en SD auxiliaire. Si l'ENA remplace les exercices réalisés habituellement sous le contrôle de l'enseignant, le SD principal en perd le contrôle, car l'avancée de l'élève dans le parcours tracé dans l'ENA n'est – dans la majorité des cas – pas accessible pour l'enseignant. Dans SCOLA il n'y avait ainsi pas la possibilité d'analyser les traces de l'activité de l'élève (même si cela figurait bien dans le projet, son exploitation par les enseignants était trop complexe). L'enseignant ne sait donc pas si l'élève avance par essais et erreurs, il voit tout au plus un score qui permet de mesurer le nombre de tentatives et plus rarement le temps passé. Il en va tout autrement lorsque l'enseignant intègre l'ENA dans l'organisation de son cours et va jusqu'à projeter le parcours de l'élève sur un tableau blanc interactif pour l'étudier avec l'ensemble de la classe. Une telle configuration didactique mise en place par l'un des enseignants du projet, exige cependant, entre autres, un rapport au numérique très développé, ce qui n'est pas actuellement à la portée ni de tous les enseignants ni de tous les établissements.

L'exemple de l'observation de SCOLA permet de souligner l'importance de la présence de l'enseignant et de l'explicitation du rôle du jeu dans le déroulement du SD. Le discours justificatif que l'enseignant donne à ses élèves renforce leur intelligibilité des types

de tâches réalisées et diminue la part de réponses devinées, entendues auprès d'un autre élève, ou obtenues par essai-erreur.

C'est en ce sens que les utilisations de SCOLA observées auprès d'élèves de collège avec des enseignants de mathématiques invitent à penser l'importance pour le projet ANIPPO d'assurer cette articulation de l'ENA dans le fonctionnement du SD principal, faute de quoi le rapport de l'élève aux épreuves mathématiques réalisées dans l'environnement risque de tomber du côté du jeu en faisant perdre l'intelligibilité de la raison d'être des mathématiques rencontrées. Lorsque le jeu l'emporte, on risque un certain genre de « démathématisation » (au sens de Kim) de l'ENA du point de vue de l'élève, mais aussi de celui de l'enseignant. Kim observait un phénomène de démathématisation au sujet de logiciels de traitement statistique des données conçus pour des non-mathématiciens : les mathématiques y sont invisibles, le logiciel opère comme une boîte noire. Dans le cas de SCOLA un phénomène analogue peut émerger : quand bien même il est annoncé que les élèves rencontreront des mathématiques dans l'environnement virtuel, si l'enseignant ne s'en préoccupe pas pour donner du sens à ces rencontres, ces mathématiques seront invisibles pour lui, l'ENA opérant comme une boîte noire de façon disjointe des praxéologies mathématiques étudiées en classe. Il est donc important que l'enseignant lui-même utilise l'ENA ou joue au jeu sérieux qu'il met entre les mains de ses élèves. Il pourra ainsi prendre connaissance du scénario du jeu ou de la configuration de l'environnement virtuel pour vérifier le sens donné aux épreuves mathématiques. Il sera alors plus en mesure de trouver des stratégies d'utilisation encourageant une rencontre avec les praxéologies mathématiques en évitant la perte de sens que nous avons observé.

CONCLUSION

Les environnements numériques d'apprentissage utilisés en éducation et en formation font l'objet de recherches dans une diversité de disciplines, mais ce sont aujourd'hui surtout des recherches en psychologie qui forment le cadre de référence théorique privilégié, centrées

notamment sur les dimensions motivationnelles ou cognitives de l'apprentissage. La revue de littérature met en lumière que la dimension didactique est peu présente dans les recherches sur les ENA et que plus particulièrement dans l'enseignement des mathématiques à l'école primaire : le risque que les ENA opèrent comme une boîte noire est bien présent. Dans la perspective de l'enseignant, on constate que celui-ci ne sait souvent pas ce qui se passe dans le jeu, et dans la perspective des recherches scientifiques on constate un phénomène analogue de déconsidération des contenus des ENA comme facteur possible de leurs effets.

L'objectif de cet article était de contribuer à souligner l'intérêt à utiliser le cadre théorique de référence de la TAD, que ce soit pour étudier les praxéologies impliquées dans l'environnement virtuel ou pour comprendre leur articulation dans le déroulement du système didactique. Afin de contribuer à une meilleure prise en charge didactique de la recherche sur les environnements numériques en éducation, la méthodologie de la recherche s'est appuyée sur deux études de cas issus de projets de recherche en France qui témoignent de la difficulté à mettre en place un dispositif de recherche à la croisée des disciplines impliquées dans le projet. Les difficultés rencontrées par les élèves et les enseignants lors des expérimentations mises en place dans le cadre du projet SCOLA confirment l'importance d'une approche anthropologique du didactique pour améliorer la compréhension des conditions actuelles du développement et de l'utilisation de ces outils tout en invitant à une vigilance épistémologique et didactique quant aux contenus véhiculés dans ces environnements et ceux dans la classe pour les accompagner.

Le constat d'un refoulement du didactique qui peut mener à un manque de problématisation de l'usage des ENA en classe, souligne l'importance d'une collaboration entre les concepteurs des environnements numériques d'apprentissage, les chercheurs de plusieurs champs scientifiques et les différents acteurs amenés à les utiliser pendant les projets de recherche et au-delà, afin de pérenniser leur existence et leurs usages raisonnés, enrichis des retours d'expérience sur leurs usages courants en dehors des conditions d'expérimentation.

RÉFÉRENCES

ALBÉRO, B. Quels enjeux pour les recherches sur les usages du numérique dans l'enseignement supérieur ?, **Distances et médiations des savoirs**, 4 [http://journals.openedition.org/dms/367 ; DOI : <https://doi.org/10.4000/dms.367>], 2012

AMADIEU, F., & TRICOT, A. **Apprendre avec le numérique : mythes et réalités**. Retz, 2014.

BOSCH, M., CHEVALLARD, Y., GARCÍA, F. J., & MONAGHAN, J. (Eds.). **Working with the Anthropological Theory of the Didactic in Mathematics Education: A Comprehensive Casebook**. Routledge, 2019.

BROUSSEAU, G. **Théorie des situations didactiques**, Grenoble : La Pensée Sauvage éditions, 1987.

CHEVALLARD, Y. **La transposition didactique**. Grenoble : La Pensée sauvage éditions, 1985, Ed. 1991.

CHEVALLARD, Y. Les savoirs enseignés et leurs formes scolaires de transmission : un point de vue didactique. **Skholê**, 7, 45-64, 1997.

CHEVALLARD, Y. Approche anthropologique du rapport au savoir et didactique des mathématiques. Dans MAURY S. & M. CAILLOT (Éds), **Rapport au savoir et didactiques**, p. 81-104. Éditions Fabert, 2003.

CHEVALLARD, Y. Vers une didactique de la codisciplinarité. Notes sur une nouvelle épistémologie scolaire. **Journées de didactique comparée 2004** (Lyon, 3-4 mai 2004), [http://yves.chevallard.free.fr/spip/spip/article.php?id_article=45], 2004.

CHEVALLARD, Y. Passé et présent de la théorie anthropologique du didactique. Conférence plénière au premier congrès international sur la théorie anthropologique du didactique. Dans L. RUIZ-HIGUERAS, A. ESTEPA, & F. JAVIER GARCIA (Éds.), **Sociedad, Escuela y**

Matemáticas. Aportaciones de la Teoría Antropológica de la Didáctica, p. 705-746, Universidad de Jaén, 2007.

CHEVALLARD, Y. La didactique, dites-vous ? **Éducation et didactique**, 4(1), 139-148, 2010.

CHEVALLARD, Y. **Journal du séminaire TAD/IDD**, 2011a.

CHEVALLARD, Y. **Didactique fondamentale. Module 1 : leçons de didactique**, Université de Provence, [http://yves.chevallard.free.fr/spip/spip/IMG/pdf/DFL_2011-2012_Module_1_LD_.pdf], 2011b.

CHEVALLARD, Y. **Journal du séminaire TAD/IDD**, 2014.

FLUCKIGER, C, BOUCHER, S, DAUNAY, B. Le temps vécu. Discours d'enseignants disposant d'un TNI sur le temps de préparation des cours, **Distances et Médiations des Savoirs**, CNED-Centre national d'enseignement à distance, (10.4000/dms.1642). (hal-01575478), 2016.

GUEUDET, G. & TROUCHE, L. Du travail documentaire des enseignants : genèses, collectifs, communautés, **Éducation et didactique**, 2(3), 7-33, 2008.

KIM, S. **Les besoins mathématiques des non-mathématiciens : quel destin institutionnel et social ? : études d'écologie et d'économie didactiques des connaissances mathématiques**, Thèse de doctorat Aix-Marseille université, 2015.

LADAGE, C. **Étude sur l'écologie et l'économie des praxéologies de la recherche d'information sur Internet : une contribution à la didactique de l'enquête codisciplinaire**. Thèse de doctorat –Université Aix-Marseille 1, Marseille, 2008.

LADAGE, C. **Questionner la didactique à partir des TIC et réciproquement**. Habilitation à diriger des recherches. Université d'Aix-Marseille, département des sciences de l'éducation, 2015.

LADAGE, C. **Enquêter pour savoir. La recherche d'information sur Internet comme solution et comme problème**. Coll. Paideia. Presses universitaires de Rennes, 2017.

LADAGE, C. & CHEVALLARD, Y. **Enquêter avec l'Internet. Études pour une didactique de l'enquête**. **Éducation & Didactique**, 5(2), 85-115, 2011.

LADAGE, C. & RAVESTEIN, J. **Rapport du dispositif d'évaluation phase 3 - Période de décembre 2015 à fin janvier 2016**. Université Aix-Marseille, laboratoire ADEF, non publié, 2016.

MENSR. MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET LA RECHERCHE. **Certificat informatique et internet enseignant 2**, [<https://c2i.enseignementsup-recherche.gouv.fr/etudiants/le-c2i-niveau-2-etudiants>], 2015.

OUTHWAITE, L., GULLIFORD, A., & PITCHFORD, N. Closing the gap: Efficacy of a tablet intervention to support the development of early mathematical skills in UK primary school children, **Computers & Education**, Volume 108, Pages 43-58, 2017.

PACURAR, E. Processus ontophanique et design des environnements numériques d'apprentissage, **Note de synthèse pour l'Habilitation à diriger des recherches**, INSA de Strasbourg, 21 novembre 2016.

PACURAR, MAGOT, C.-A., CABASSUT, R., & SOLON Y. Virtual manipulatives in inquiry-based approach of 3D problems by French 5th graders, *Teaching Mathematics and Computer Science*, DOI: 10.5485/TMCS.2020.0507, 2020.

Revue STICEF (Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation), *Éditorial*, consulté le 1^{er} octobre 2020. 2014